

电机驱动控制系统及其功率器件的工艺设计研究

郑雪钦

指导教师

郭东辉教授

厦门大学

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 23120070153493

UDC_____

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

电机驱动控制系统及其功率器件的
工艺设计研究

Motor Drive Control System and Process

Design of Power Devices

郑 雪 钦

指导教师姓名: 郭 东 辉 教 授

专 业 名 称: 电 路 与 系 统

论文提交日期: 2 0 1 1 年 月

论文答辩时间: 2 0 1 1 年 月

学位授予日期: 2 0 1 1 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2011 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

电机驱动控制系统主要由电机本体、功率驱动电路、控制单元等组成。一套性能良好的驱动控制系统，可以在某种程度上弥补电机性能的不足。为了提高步进电机驱动控制系统调速和定位精度、改善步进现象及解决双馈风力发电系统的并网和低电压穿越等问题，本论文的研究内容主要围绕步进电机控制技术、双馈电机风力发电系统励磁控制和低电压穿越技术、驱动控制器中高压功率器件工艺的理论分析和应用研究，取得了一些的研究成果。论文的创新之处在于：

(1)、在步进电机驱动控制系统中，研究了步进电机模糊遗传自适应 PID 控制器，采用模糊自适应整定 PID 参数、遗传算法整定 PID 初始参数，从而使系统速度响应曲线具有较小的超调量，起动速度快，受负载扰动时，系统恢复稳定时间短，抗负载突加能力强。提出了步进电机计算动词 PID 控制器，仿真和实验结果表明，系统具有动态响应快，系统运算时间短，控制过程较为简单。提出了混合微步 PWM 驱动控制技术，解决步进电机运行过程中存在步进现象、步距角较大、在低速转动时易产生振动、转速不够平稳及运行发生振荡的问题。仿真结果表明，步进电机绕组电流正弦度好，转子位置波形平滑，改善步进现象，从而抑制了步进电机的振荡。

(2)、建立了双馈电机风力发电系统数学模型，研究了双矢量 PWM 控制方法。分析网侧变换器 PWM 控制方法和机侧变换器定子磁场定向控制方法，实现系统并网过程几乎没有任何冲击，进入稳态过程较快，定子侧电流、电压稳态时均为正弦波，双馈发电机注入电网谐波电流基本为零。提出了基于定子绕组有源低电压穿越保护电路，该方法可以很好地限制转子绕组的过电流情况，并提供了在电网电压跌落期间保持正常的运行所需稳定的直流母线电压；同时双馈电机向系统进行无功功率补偿，直到电网电压的恢复。

(3)、研究了新型的 SJ-IGBT 器件结构的特点，把超结理论运用在高压功率 IGBT 器件上，解决了器件耐压与导通电阻之间“硅限”的问题，在相同的结构参数，同样的击穿电压情况下，SJ-IGBT 的导通电阻比传统的 IGBT 导通电阻大大减小。

本文所提出的新方法都是以提高电机驱动控制系统的性能为重点,注重提出的控制方法的可行性和可实现性,完成步进电机智能驱动控制器的设计。

关键词: 驱动控制系统; 计算动词; 双矢量 PWM; 低电压穿越; SJ-IGBT

厦门大学博士论文摘要库

ABSTRACT

The drive control system of the motor is mainly made of the motor, power drive circuit and control unit. A good performance-driven control system can somehow make up for lack of motor performance. In order to improve the speed and position precision of the stepper motor, solve the step phenomenon of the stepper motor and the network technology and low voltage dip of the double-fed wind power generation systems, This paper mainly focuses on the of the stepper motor technology, DFIG wind power system excitation control and low-voltage ride through technology, the theoretical analysis of high voltage and power device technology. The Innovations of this paper are:

(1)、In control system of the stepper motor, the fuzzy genetic adaptive of the PID controller is proposed, which PID parameters with fuzzy adaptive tuning parameters and genetic algorithm tuning initial PID parameters are used. The curve of system speed response has a small overshoot, fast starting by load disturbance and the time of system restoring stability is short, strong ability of anti sudden load. The computational verb PID controller is proposed. Simulation and experimental results show that the system has fast dynamic response. The time of operation time is short. The control process is relatively simple. As the stepper motor exists the stepper phenomena, large step angle, easy to produce vibration in low-speed rotation , and speed is not enough to run smoothly, a mixed micro-step PWM drive control technology is proposed. The Simulation results show that sinusoidal current of the stepper motor windings are good, smooth wave rotor position, which improve the step phenomenon and inhibit the stepper motor oscillation.

(2)、The mathematical model of DFIG wind power generation is established. The double-vector PWM control is studied. The PWM control of the grid side converter and stator flux orientation of the motor side converter are analyzed. The control method shows no impact on the process of connecting the grid, fast steady state, the sine wave of current and voltage of the stator. The harmonic current of the DFIG injection to the grid is basically zero. The circuit of the active low voltage dip protection based on the stator windings is proposed. The over-current of rotor

winding is well limited. The DC bus voltage keeps stable when the voltage sags happen. And at the same time, DFIG provides the reactive power to the system of compensation until the grid voltage recovery.

(3)、The new type of SJ-IGBT device is studied. The theory of super-junction is applied to the high voltage and power IGBT, which can solve the silicon limit between on-resistance and breakdown voltage. At the same structural parameters, the on-resistance of SJ-IGBT can greatly reduce.

The purpose of new proposed methods is to improve the performance of the motor drive control system. The control methods focus on the feasibility and the intelligent drive controller of the stepper motor is designed and realized.

Keywords: drive control system; computational verb; double-vector PWM; low voltage dip; SJ-IGBT

目 录

第一章 绪论	1
1.1 电机驱动控制系统的概述	1
1.2 电机驱动控制系统的关键技术及其研究进展	9
1.3 关键问题及本文研究工作的重点	16
1.4 本论文的章节安排	17
第二章 相关数学模型与理论基础	18
2.1 引言	18
2.2 步进电机的相关数学模型	18
2.3 风力发电系统的数学模型	21
2.4 PID 控制器算法	28
2.4.1 PID 控制器原理	28
2.4.2 数字 PID 控制器算法	30
2.5 智能控制算法	32
2.5.1 模糊控制理论	32
2.5.2 遗传算法	34
2.5.3 计算动词理论	38
2.6 本章小结	40
第三章 步进电机实时自适应智能控制技术	42
3.1 引言	42
3.2 模糊遗传自适应控制器	42
3.2.1 模糊控制器的设计	42
3.2.2 初始参数的整定	47
3.2.3 实时自适应控制器的设计	48
3.2.4 仿真结果与分析	50
3.3 计算动词 PID 控制器	52
3.3.1 定义误差绝对值 $ e $ 的模糊集	52
3.3.2 建立动词控制规则	53
3.3.3 动词相似度	54

3.3.4 动词控制规则的实现·····	55
3.3.5 计算动词 PID 控制器的设计·····	55
3.4 混合微步驱动控制技术的实现·····	60
3.4.1 两电平 PWM 和三电平 PWM 控制原理·····	61
3.4.2 混合 PWM 驱动控制技术·····	63
3.4.3 混合微步驱动控制的设计·····	63
3.4.4 仿真结果及分析·····	64
3.5 本章小结·····	68
第四章 双馈电机风力发电系统控制技术·····	69
4.1 引言·····	69
4.2 双馈电机风力发电系统并网分析·····	70
4.2.1 网侧变换器控制策略·····	70
4.2.2 机侧变换器控制策略·····	73
4.2.3 仿真结果及分析·····	75
4.3 双馈电机风力发电系统低电压穿越技术·····	77
4.3.1 双馈电机在电压跌落时的响应·····	77
4.3.2 电网电压跌落响应特性分析·····	78
4.3.3 风力发电系统低电压穿越保护电路·····	84
4.4 本章小结·····	92
第五章 高压功率器件工艺的研究·····	93
5.1 引言·····	93
5.2 IGBT 结构及特性分析·····	93
5.2.1 IGBT 结构及原理·····	93
5.2.2 IGBT 的特性分析·····	95
5.3 高压功率器件的终端技术·····	97
5.3.1 结终端扩展技术·····	97
5.3.2 场板技术·····	98
5.3.3 场限环技术·····	99
5.4 高压功率器件 IGBT 仿真与优化分析·····	99

5.5 本章小结.....	106
第六章 电机驱动控制系统及其应用设计.....	107
6.1 引言.....	107
6.2 步进电机驱动控制系统的硬件设计.....	107
6.3 步进电机驱动控制系统的软件设计.....	112
6.4 实验结果及分析.....	115
6.5 本章小结.....	116
第七章 工作总结与今后的研究方向.....	117
7.1 工作总结.....	117
7.2 今后的研究方向.....	118
参考文献.....	120
读博士期间发表和待发表的论文.....	132
致谢.....	133

CONTENTS

1. INTRODUCTION.....	1
1.1 Overview of the Motor Drive Control System.....	1
1.2 Technology and Development of Motor Drive Control System.....	9
1.3 Key Problems and Synopsis of Our Works.....	16
1.4 Thesis Structure	17
2. Mathematical Model and Theoretical Basis	18
2.1 Introduction	18
2.2 Mathematical Model of the Stepper Motor.....	18
2.3 Mathematical Model of Wind Power Generation System.....	21
2.4 PID Controller Algorithm.....	28
2.4.1 PID Controller Principle.....	28
2.4.2 Digital PID Controller Algorithm.....	30
2.5 Intelligent Control Algorithm.....	32
2.5.1 Fuzzy Control Theory.....	32
2.5.2 Genetic Algorithm.....	34
2.5.3 Computational Verb Theory.....	38
2.6 Section Conclusion	40
3. Technology of Real-time Adaptive Intelligent Control of the Stepper Motor	42
3.1 Introduction	42
3.2 Fuzzy Genetic Adaptive Controller.....	42
3.2.1 Design of Fuzzy Controller	42
3.2.2 Tuning of Initial Parameter.....	47
3.2.3 Design of Real-time Adaptive Controller	48
3.2.4 Simulation Results and Analysis	50
3.3 Computational Verb Controller.....	52
3.3.1 Definition the Fuzzy Sets of Absolute Error $ e $	52
3.3.2 Establishment of Verb Control rules.....	53
3.3.3 Verb Similarity.....	54
3.3.4 Implementation of the Verb Control Rules.....	55
3.3.5 Design of Computational Verb PID Controller.....	55
3.4 Achievement of Mixed Micro-step	60
3.4.1 Control Principle of Two Level and Three Level PWM.....	61
3.4.2 Technology of Mixed PWM	63
3.4.3 Design of Mixed Micro-step Control.....	63
3.4.4 Simulation Results and Analysis	64
3.5 Section Conclusion	68
4. Technology of DFIG Power Generation System	69
4.1 Introduction	69
4.2 Analysis of DFIG Wind Power Generation System Connecting the Grid.....	70
4.2.1 Control Strategy of the Grid Side Converter	70
4.2.2 Control Strategy of the Rotor Side Converter.....	73

4.2.3	Simulation Results and Analysis·····	75
4.3	Low Voltage Ride Through of DFIG Power Generation System ·····	77
4.3.1	Double-fed Motor Response under the Voltage Drop·····	77
4.3.2	Response Characteristics of Grid Voltage Dip·····	78
4.3.3	Protection Circuit under Low Voltage Ride Through of Wind Power Generation System ·····	84
4.4	Section Conclusion ·····	92
5.	Technology of High Power Devices·····	93
5.1	Introduction ·····	93
5.2	Structure and Characteristics of IGBT·····	93
5.2.1	Structure and Principle of IGBT·····	93
5.2.2	Characteristics of IGBT·····	95
5.3	Technology of High-voltage Power Device Terminal·····	97
5.3.1	Technology of Terminal Extension ·····	97
5.3.2	Field Plate Technology·····	98
5.3.3	Field limiting Ring Technology·····	99
5.4	Simulation and Optimization Analysis of High Power IGBT·····	99
5.5	Section Conclusion ·····	106
6.	Motor Drive Control System and Application Design·····	107
6.1	Introduction·····	107
6.2	Hardware Design of Stepper Motor Drive Control System·····	107
6.3	Software Design of Stepper Motor Drive Control System·····	112
6.4	Experiment Result and Analysis·····	115
6.5	Section Conclusion·····	116
7.	Summary and Future Work·····	117
7.1	Summary·····	117
7.2	Future Work·····	118
	References·····	120
	Published and Submitting Papers List·····	132
	Acknowledgement·····	133

第一章 绪论

1.1 电机驱动控制系统的概述

人类社会发展的进程中，能源永远是人类赖以生存的物质基础，科学技术的发展是和能源的获取、利用、变换紧密联系在一起。由于电能的产生和变换过程高效、传输分配较容易、使用控制很方便，因此获得了最为广泛的应用。电能的产生和变换涉及到机械能与电能两种形态能量之间的转换，电机作为机电能量转换的关键设备，使得电机驱动控制技术的发展直接关系到能源的高效利用和有效变换，能源的开发和节约[1]。

电机驱动控制系统是以电机为控制对象、以控制器为核心、以电力电子技术为手段、以自动控制理论为指导、并与检测技术和数据通信技术相结合所组成的电气传动控制系统。电机驱动控制系统组成要素如图 1.1 所示。近年来，随着微电子技术、电力电子技术、微型计算机技术、电机控制理论的发展，电机驱动控制技术有了长足的进步，借助于计算机技术、现代控制理论的发展，人们有可能构成高精度、快速响应的电机驱动控制系统[2]。

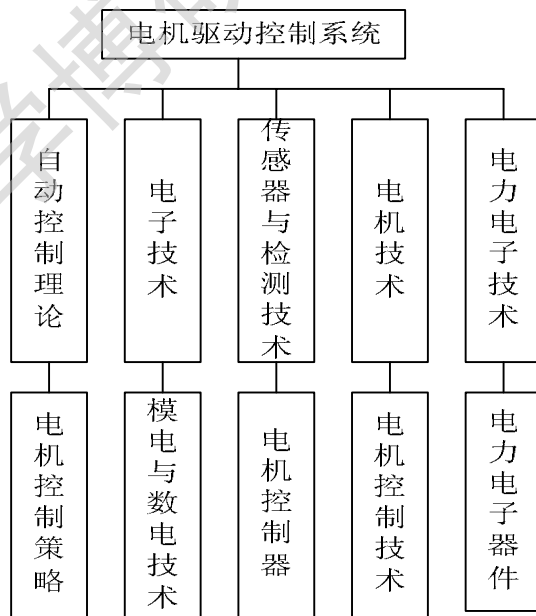


图 1.1 电机驱动控制系统组成要素

电机的基本工作原理是利用带电导体和磁场间的相互之间作用进行电能和机械能的相互转换，其分类如图 1.2 所示。电动机实现电能到机械能之间的转

换，发电机实现机械能到电能之间转换。在 1888 年，美国发明家特斯拉发明了根据电磁感应原理交流电动机，其结构简单，使用交流电，无需整流、无换向、无火花，被广泛应用于家庭电器中。交流电机主要分为异步电机和同步电机。同步电机主要作为发电机使用，而异步电机则主要作为电动机使用。异步电机根据相数可分为单相异步电机、两相异步电机和三相异步电机。三相异步电机根据转子结构的不同可分为绕线式三相异步电机和三相鼠笼式异步电机。目前，交流调速已成为满足各种生产工艺要求和节约电能的重要措施，在电气传动领域中用交流电机调速逐步取代直流电机调速[3]。

自 20 世纪 80 年代以来，各种控制电机也纷纷问世，如伺服电动机、步进电动机、力矩电动机等，这些电机以其特殊功能为自动控制系统的性能提高作出不可磨灭的贡献。它们能够传递和变换信号，用作执行元件或信号元件，使各种控制动作可靠、迅速、准确。控制电机主要应用于航空航天、现代军事装备、现代工业、电子与信息产品、现代交通运输及现代农业等领域[4]。

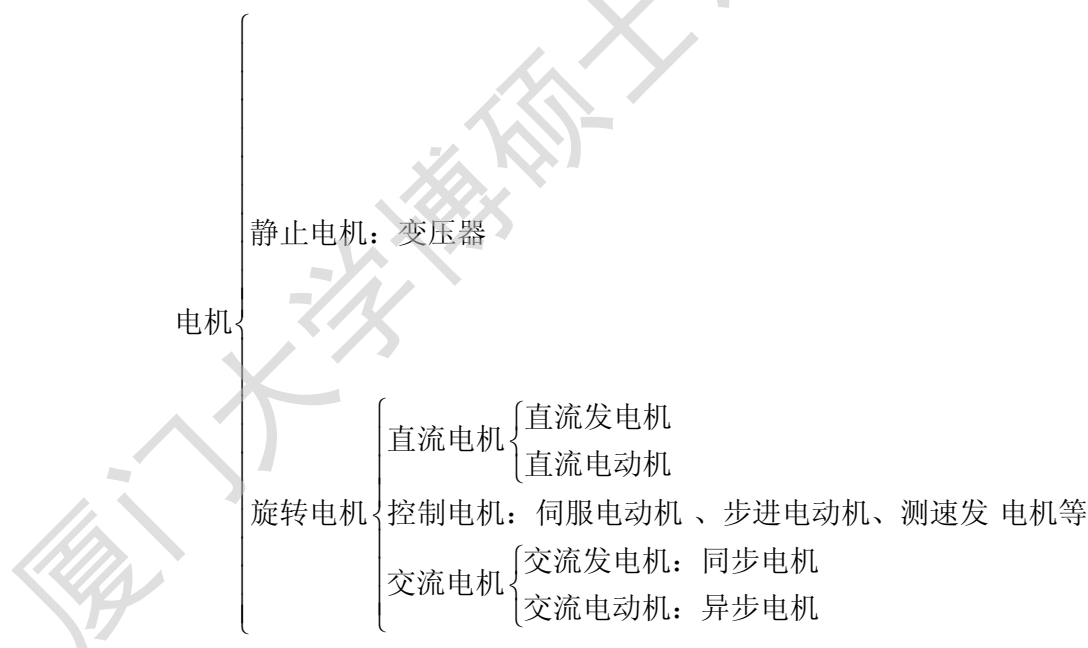


图 1.2 电机分类

电机驱动控制系统一般由控制设备、电源、负载、电动机及传动机构组成，其中电源为电动机和控制设备提供电源，电动机通过传动机构带动负载完成既定的工作，其结构图如图 1.3 所示。电机驱动控制技术主要应用于电机的运行状态、特性控制，最主要体现在电机的速度控制、位置控制、转矩控制和发电机的励磁调节。

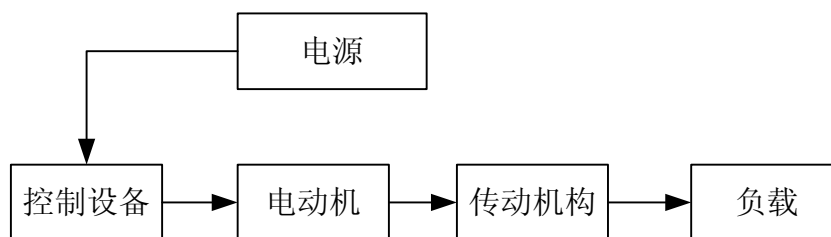


图 1.3 电机驱动控制系统

在速度控制方面，现代工业生产中有两种情况需要进行电机速度的控制，一是需要满足运行情况及生产工艺的要求，如对于电梯、造纸及机床、轧钢设备，需要电机的正转、反转、制动、电动四象限运行；电动车辆要求低速恒转矩、高速恒功率；二是实现调速节能情况。采用电机调速节能时，电机输入功率大大减少，产生高达 20%~30%的节能效果。按照电机类型的不同，电机调速控制可分为直流调速和交流调速[5]。

直流调速是对直流电动机的速度控制，典型的控制原理图如图 1.4 所示。直流电机调速系统容易获得良好的控制性能和快速的动态响应，是因为在直流调速系统中，电枢电流和励磁磁通相互间没有耦合，可以通过控制相应的电流加以控制，在变速控制系统中，直流调速过去一直占据着主导地位。但是，直流电机调速系统存在换向器和电刷，使得系统结构复杂、机械强度低、电刷产生火花、维护困难，难于制造大容量、高压及高速直流电机[5]。

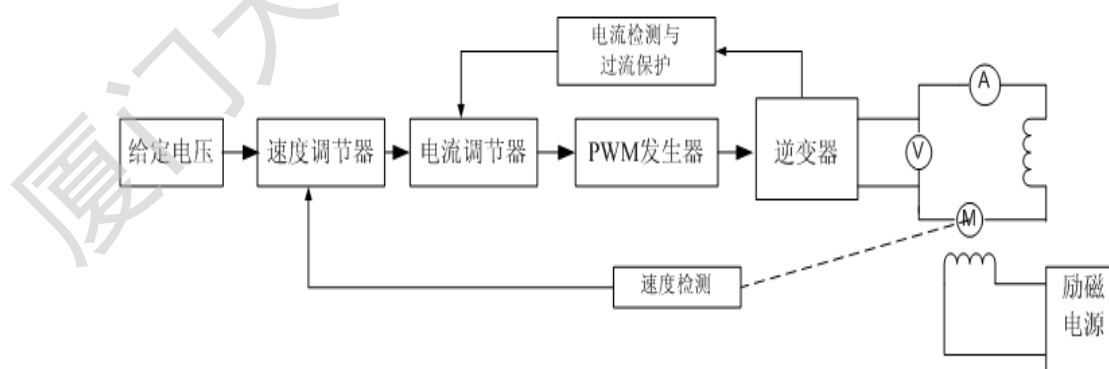


图 1.4 直流调速系统原理图

随着电力电子技术、微控制器、电机控制理论的发展，交流调速系统得到快速发展，已逐步取代直流调速系统，在电气传动领域占主导地位。典型的交

流电机调速系统原理图如图 1.5 所示[6]。

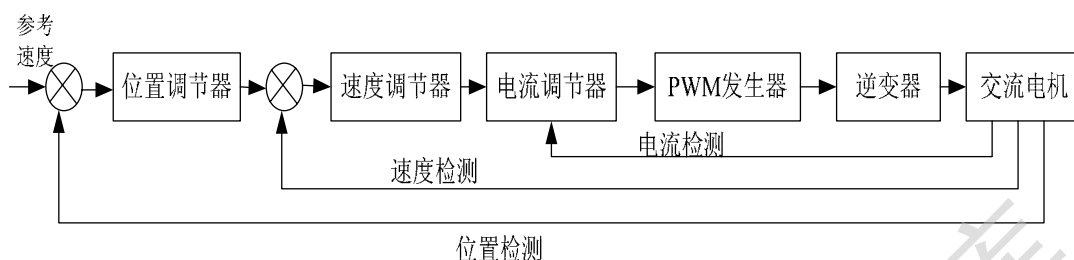


图 1.5 交流电机调速系统原理图

交流电机调速系统的发展是与电力电子技术和微机控制技术的发展紧密联系的，电力电子器件和微机控制器构成交流电机调速系统的基础。电力电子器件的作用更为关键，新一代电力电子器件的出现必将推出新一代的变换器，从而形成新一代的交流电机调速系统。表 1 是随着电力电子器件的技术发展，电机驱动控制技术的发展历程[7][8]。

从表 1 中可以看出，电力电子器件的不断进步，为电机驱动控制系统的完善提供了前提物质保证。特别是新型的可关断功率器件模块智能化，如 IGBT Modules, IPM Modules 等的商品化，使得基于各种先进的数字信号处理器的高性能、高频率化 PWM 脉宽调制控制技术在电机驱动控制方面得到了广泛应用[9]。

在电机的位置控制方面，随着自动控制技术及微机控制技术的发展，伺服电动机的应用范围日益广泛，对其性能的要求也在不断的提高。由于新技术、新材料和新工艺的出现促进伺服电动机的进一步发展，涌现出许多新型的电机结构，如取消了传统直流电动机上的换向器和电刷，采用了电子器件换向的直流无刷电动机；取消减速装置，采用直接驱动负载的直流力矩电动机和步进电机等。步进电机在数控控制、精密和超精密加工、机器人终端定位、集成电路芯片加工和版图拍照等系统应用领域里，有 2/3 以上采用步进电机作为伺服控制[10]。近年来，计算机技术、控制技术及微电子技术的发展，有力地推动了步进电机控制技术的发展，提高了步进电机运动控制装置的应用水平。步进电机应用系统已经由较早的开环系统和简单闭环系统，逐渐发展成为高性能的步进伺服系统。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库